Teoría del Residuo Termodinámico Cuántico (TRT-C)

Un campo escalar reabastecido por la traza del tensor de energía-momento como origen dinámico de la energía oscura

Dr. Carlos David Bianco Moreno

C.I.: 17.570.016

carlosdavid1985@hotmail.es

Venezuela 20/12/2025

Resumen

TRT-C propone que la energía oscura es la energía potencial de un **campo escalar ligero** ϕque se **reabastece dinámicamente** mediante un acoplamiento débil a la traza T_{SM}del tensor de energía-momento del sector estándar. La teoría se formula a partir de una acción covariante, conduce a ecuaciones de fondo y de perturbación bien definidas, y produce un término de transferencia Qentre materia y campo que puede contrastarse con observaciones cosmológicas. Presentamos la motivación física, el formalismo matemático completo, el análisis de estabilidad y perturbaciones

Introducción

La aceleración cósmica observada exige una fuente con presión negativa. El modelo estándar ΛCDM describe esto mediante una constante cosmológica Λ, pero enfrenta problemas conceptuales: el ajuste fino de la energía del vacío y la coincidencia temporal entre densidades de materia y energía oscura. TRT-C ofrece una alternativa dinámica y conservadora: mantiene la Relatividad General intacta y propone que la densidad de energía oscura se genera por transferencia desde la materia hacia un campo escalar ϕa través de un acoplamiento proporcional a la traza T_{SM}. Esta hipótesis explica por qué la energía oscura puede volverse dominante en la época actual sin introducir campos exóticos adicionales más allá de ϕ.

Explicación física de la teoría

Idea central. Existe un campo escalar ϕmuy ligero cuya energía potencial $V(\phi)$domina su dinámica cosmológica en régimen de rodaje lento. La interacción efectiva con la materia estándar se modela por un término $-g\,\phi\,T_{\mathrm{SM}}$en la acción, con $g$adimensional y extremadamente pequeño. Cambios en la densidad de materia y procesos irreversibles actúan como fuente que excita ϕ, transfiriendo energía hacia el sector de vacío efectivo.

Comportamiento cosmológico.

- **Época temprana:** $\rho_m$domina; la fuente es grande pero la dinámica global se aproxima a ΛCDM.
- **Transición:** la acumulación de $\rho_\phi$conduce a la aceleración cuando $\rho_\phi \sim \rho_m$.
- **Época tardía:** la fuente se apaga; ϕtiende a un mínimo efectivo y la expansión puede aproximarse a exponencial o evolucionar según $V(\phi)$.

Ventajas conceptuales. Parsimonia ontológica (no requiere partículas exóticas adicionales), mecanismo dinámico para la coincidencia y derivación desde una acción covariante que permite estudiar estabilidad y perturbaciones.

Formalismo matemático

Acción y variación

Proponemos la acción covariante

$$S = \int d^4x\sqrt{-g}\left[\frac{1}{16\pi G}R - \frac{1}{2}\partial^\mu\phi\,\partial_\mu\phi - V(\phi) + \mathcal{L}_{\mathrm{SM}} - g\,\phi\,T_{\mathrm{SM}}\right],$$

donde $T_{\mathrm{SM}} = g^{\mu\nu}T_{\mu\nu}^{\mathrm{SM}}$y $g$es la constante de acoplamiento.

Ecuaciones de campo

Variando respecto de la métrica y de ϕse obtienen:

Ecuaciones de Einstein

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G\left(T_{\mu\nu}^{\mathrm{SM}}+T_{\mu\nu}^{\phi}\right),$$

con

$$T_{\mu\nu}^{\phi} = \partial_\mu\phi\,\partial_\nu\phi - g_{\mu\nu}\left(\frac{1}{2}\partial^\alpha\phi\,\partial_\alpha\phi + V(\phi)\right).$$

Ecuación del campo escalar

$$\Box\phi + V'(\phi) = g\,T_{\mathrm{SM}}.$$

Conservación total Las identidades de Bianchi implican

$$\nabla^\mu\left(T_{\mu\nu}^{\mathrm{SM}}+T_{\mu\nu}^{\phi}\right) = 0,$$

de donde se deduce el intercambio de energía-momento entre sectores:

$$\nabla^\mu T_{\mu\nu}^{\mathrm{SM}} = -g\,T_{\mathrm{SM}}\nabla_\nu\phi, \nabla^\mu T_{\mu\nu}^{\phi} = +g\,T_{\mathrm{SM}}\nabla_\nu\phi.$$

Cosmología de fondo (FLRW)

En un fondo homogéneo e isótropo con $\phi = \phi(t)$y materia no relativista $T_{\mathrm{SM}} \simeq -\rho_m c^2$, las ecuaciones de fondo son

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = -g\,\rho_m c^2,$$

$$\dot{\rho}_m + 3H\rho_m = -Q, \dot{\rho}_\phi + 3H(\rho_\phi + p_\phi) = +Q,$$

donde

$$\rho_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi), p_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi),$$

y definimos la tasa de transferencia covariante

$$Q \equiv g\,\rho_m\,\dot{\phi}\,c^2.$$

En régimen *slow-roll* ($\ddot{\phi} \ll 3H\dot{\phi}$, $\dot{\phi}^2 \ll V$) se obtiene la estimación

$$\dot{\phi} \simeq -\frac{g\,\rho_m c^2}{3H}, Q \simeq \frac{g^2}{3H}\rho_m^2 c^2.$$

Perturbaciones lineales

Trabajando en gauge Newtoniano con potenciales Ψ, Φ, las variables relevantes son δ_m, θ_my $\delta\phi$. Las ecuaciones lineales se escriben de forma consistente con la conservación total; esquemáticamente:

Continuidad materia

$$\dot{\delta}_m + \frac{\theta_m}{a} - 3\dot{\Phi} = -\frac{Q}{\rho_m}\delta_m - \frac{\delta Q}{\rho_m},$$

Euler materia

$$\dot{\theta}_m + H\theta_m - \frac{k^2}{a}\Psi = -\frac{Q}{\rho_m}\theta_m,$$

Campo escalar

$$\delta\ddot{\phi} + 3H\delta\dot{\phi} + \left(\frac{k^2}{a^2} + V''(\phi)\right)\delta\phi - 4\dot{\phi}\dot{\Phi} + 2V'(\phi)\Phi = g\,\delta T_{\mathrm{SM}},$$

con $\delta T_{\mathrm{SM}} \simeq -\rho_m c^2 \delta_m$y

$$\delta Q = g\big(\rho_m \delta\dot{\phi} + \dot{\phi}\,\delta\rho_m\big)c^2.$$

Condiciones de estabilidad: exigir ausencia de ghosts (coeficiente positivo de $\delta\dot{\phi}^2$), $m_{\mathrm{eff}}^2 \equiv V''(\phi)$ +correcciones ≥ 0y velocidad de sonido efectiva física.

Comparación con otras teorías y observables

ΛCDM (constante cosmológica). TRT-C es dinámica y explica la coincidencia por acumulación histórica; ΛCDM es más simple pero conceptualmente problemático respecto al ajuste fino.

Quintessence. Ambos usan campos escalares; TRT-C añade un término fuente gT_{SM}que reabastece ϕ, lo que cambia la evolución de $w(z)$y la dependencia temporal de la energía oscura.

Modelos interactivos fenoménicos. TRT-C deriva Qdesde una acción; su forma efectiva $Q \propto \rho_m^2/H$(en slow-roll) difiere de kernels lineales $Q \propto H\rho$y tiene implicaciones distintas en épocas tempranas.

Cosmología viscosa. La viscous cosmology introduce presión viscosa macroscópica; TRT-C ofrece una justificación microfísica efectiva para la transferencia de energía sin introducir viscosidad ad hoc.

PBH / evaporación. Modelos que atribuyen la energía oscura a la radiación de Hawking dependen de poblaciones de objetos y están fuertemente restringidos por microlente y fondo gamma; TRT-C evita esas limitaciones pero enfrenta límites por pruebas locales de quinta fuerza.

Observables clave y falsabilidad. TRT-C predice desviaciones en $H(z)$, evolución característica $w(z)$, y una ligera supresión del crecimiento de estructuras $f\sigma_8(z)$. Las misiones Euclid, Roman y sondeos como LSST pueden acotar o detectar estas desviaciones; pruebas locales (torsión-balance, equivalencia) imponen límites fuertes sobre g.

Implementación numérica y plan de confrontación con datos

Objetivo. Integrar el sistema de fondo y perturbaciones, evaluar estabilidad y ajustar parámetros con datos cosmológicos para acotar gy parámetros de $V(\phi)$.

Sistema a integrar (en variable $N = \ln\ a$o tiempo cósmico):

$$\begin{cases}\dot{\rho}_m = -3H\rho_m - Q, \backslash[4pt]\ddot{\phi} = -3H\dot{\phi} - V'(\phi) - g\,\rho_m c^2, \backslash[4pt]H^2 = \frac{8\pi G}{3}\left(\rho_m + \rho_r + \rho_\phi\right).\end{cases}$$

Potenciales de prueba.

- $V(\phi) = V_0$(constante dinámica).
- $V(\phi) = V_0 + \frac{1}{2}m^2\phi^2$con $m \ll H_0$.
- $V(\phi) = V_0 e^{-\lambda\phi/M_{\text{pl}}}$.

Condiciones iniciales. $z_{\text{ini}} \sim 10^6$o recombinación; $\phi(z_{\text{ini}})$pequeño, $\dot{\phi}(z_{\text{ini}}) \approx 0$; ρ_m, ρ_rsegún ΛCDM.

Esquema numérico. Integrador stiff (LSODA/BDF), paso adaptativo, control de conservación energética. Implementar perturbaciones para varios ky calcular $f\sigma_8(z)$.

Ajuste con datos. Likelihoods: Planck compressed, BAO, Pantheon SNIa, $f\sigma_8$. Sampler MCMC (emcee/Cobaya). Parámetros libres: g, parámetros de $V(\phi)$, $\Omega_{m,0}$, H_0.

Entregables. Curvas $H(z)$, $w(z)$, $\rho_i(z)$; $f\sigma_8(z)$comparado con datos; contornos de parámetros y límites en g; informe de estabilidad de perturbaciones.